第4章

マイコン搭載電子機器からの不要電磁放射低減

動作クロックの高調波が偶数倍，奇数倍に発生する理由と対策法

馬渕雄一，中村 篤，大前 彩

ここでは，自動車用マイコンおよびマイコン搭載基板に施す放射対策を例に，アンテナ放射のしくみやコモン・モード電流発生の過程を解説する．　　　　（編集部）

現在，各個人が当たり前のように携帯電話を所有しています．また，オフィスや家庭には，パソコンをはじめとするさまざまな電子機器が数多く存在し，私たちの仕事や生活を支えています．駅やホテル，ファーストフード店などでは，無線LANのアクセス・ポイントが設置され，顧客へインターネットへの接続サービスを行っているところも数多く見受けられるようになりました．さらには，地上波デジタル放送の開始により，高画質な映像を家庭にあるテレビや携帯機器などで容易に見られるようになりました．

このように普段生活している空間では，テレビやラジオ，携帯電話，無線通信など，目には見えない多くの電波が飛び交い，さまざまな情報を運んでいます．このような環境下で動作する電子機器に対しては，その動作時において，外来電磁波の影響を受けないことはもちろん，放送や通信に用いる電波を妨害することがないよう「自ら不要な電磁波を放射しないこと」が強く求められます．この意味で，電子機器の外来電磁波に対する耐性や不要電磁波の放射に関する問題では，EMC（electro-magnetic compatibility；電磁環境適合性）という言葉が用いられます．

電子機器の開発や販売においては，機器からの不要電磁波をある一定レベル以下に抑えるように強く促す，さまざまな規制が存在します．例えば，国際的にはIEC（International Electrotechnical Commission）という機関が国際標準規格について議論しています．また，VCCI（日本），FCC（米国），EC指令（欧州）というように，各国レベルでも規制が存在します．これら規制をクリアすることが電子機器製品を開発する上で重要なウェイトを占めるようになっています．

自動車分野において，EMC問題は特に重要です．自動車には，ラジオやテレビ，カー・ナビゲーション・システムといった電波を受信する機器が搭載されます．一方で，エンジンやブレーキ，エアバック，走行の制御からメータ・パネルの制御にいたるまで，実にさまざまな電子機器が搭載されます．これら電子機器には，おのおのマイコンが搭載されており，不要な電磁波を放射する原因になります．

自動車という閉じた空間においては，「電波を受信する機器」と「妨害電波を放射する可能性のある機器」が混然一体となって搭載されています．この様子を**図1**に示します．このため，自動車に搭載される電子機器には，EMCに関

FMラジオなどの放送電波
アンテナ
不要電磁放射
電子機器

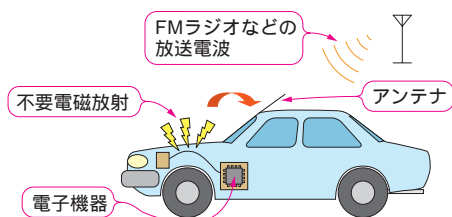



図1　ラジオ周波数帯でのノイズ問題

自動車にはラジオなどの電波を受信する機器が搭載されている．エンジン制御などの車載電子機器が動作する際に，不要な電磁波を放射する場合があり，これが車載アンテナに乗ることで放送波の受信が妨害されることがある．

KeyWord　ワイヤ・ハーネス，コモン・モード電流，マイコン，スペクトル，ループ・アンテナ，モノポール・アンテナ，インピーダンス，貫通電流

4

して自動車メーカが独自に定める規制をクリアしないと製品を納入できないことすらあります．車載電子器におけるEMCは，製品性能の1項目として評価されます．

1. 電子機器におけるEMC問題は早期対策が肝

車載電子機器のEMC対策には，当然ながらコストがかかります．また，製品開発の各段階において対策手法の自由度も限られてきます．この関係を図2に示します．

過去の事例では，試作品が完成した後の性能テストにおいて，EMCの問題が顕在化した後に対策することがしばしば行われてきました．この段階では，シールドを施すことやノイズ・カット・フィルタを挿入することくらいしか対策の選択肢はありません．その効果も各機器の実装状況により異なります．このため，対策にかかるコストはおのずと高くなります．

これに対し近年では，「EMC設計」なる製品設計思想が主流となりつつあります．製品開発の初期段階において，EMCも考慮にいれた設計を行うのです．例えば，マイコンを実装するプリント基板の配線パターン設計の際に，不要電磁放射の抑制を考慮します．これにより，EMC対策に対して，より少ないコストで高い効果が期待できるようになります．この設計思想を効果的に実現するためには，設計者自ら不要電磁放射の発生メカニズムや対策の基礎知識を身に付けることが一番の近道であると考えます．

以下では，車載電子機器のEMC問題をターゲットに，特に重要となるラジオ周波数帯域（約100MHz以下）に的を絞り議論します．車載電子機器には電力供給や情報通信の目的でワイヤ・ハーネスが接続されます．まず，ラジオ周波数帯域では，ワイヤ・ハーネスを流れるコモン・モード電流が，不要電磁放射と密接な関係があることを示します．

次に，このハーネスを流れるコモン・モード電流が，マイコンの動作によっていかにして発生するかを述べます．この結果から，コモン・モード電流の低減に対する有効な対策手法を，実際のマイコンを実装した評価基板を用いた実験により確かめます．最後に，今後のEMC設計の在り方について簡単に議論し，まとめを述べます．

図2　製品開発レベルとEMC対策にかかるコストおよび対策の自由度の関係

製品開発の初期段階では，EMC対策の自由度が大きく，低コストで効率的なノイズ対策が可能．しかし，量産に近づくほど選択可能な対策手法も限られる．この結果，対策コストも増加している．

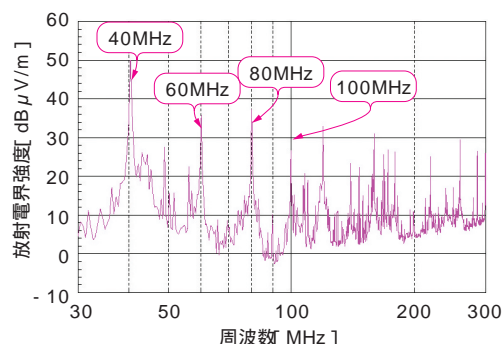



図3　マイコン搭載電子機器からの不要電磁放射スペクトル

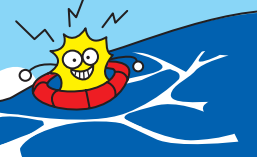
動作周波数20MHzのマイコンを搭載する車載電子機器からの不要電磁放射スペクトルの測定結果の例．マイコンの動作周波数である20MHzの整数倍の位置に，強いピークが存在している．

2. 不要電磁放射とコモン・モード電流

自動車において，各種制御用機器に実装されるマイコンは，主に数十MHzのクロックで駆動するものが多く用いられています．これらマイコンが動作する際，動作周波数の整数倍に強いピークを持つ不要電磁放射が発生します．ラジオやテレビの電波は，主に100M～200MHz以下の周波数帯域を用いて送信されています．マイコンの動作により発生する不要電磁放射がこれら放送波の受信を妨害するという問題が発生します．

マイコンを搭載する電子機器からの不要電磁放射のスペクトルの例を図3に示します．この図から分かるように，マイコンの動作周波数である20MHzの整数倍の周波数に強いピークを持つ電磁波が放射されています．

● 何が発振源で何がアンテナなのか

自動車に搭載される電子機器には，電力の供給や情報通

信の目的から，ワイヤ・ハーネスが接続されます．このワイヤ・ハーネスは，車体の前部から中央部，後部までを結ぶため，その長さは数mにおよぶ場合もあります．

電磁波は，アンテナとアンテナを駆動する発振源が組み合わさることで，効率的に放射されます．したがって，車載電子機器を構成するマイコン，プリント基板，ワイヤ・ハーネスのいずれが発振源であり，アンテナであるかを確かめることは，対策を進める上で非常に重要となります．

この車載電子機器の構成を**図4**に示します．まず，発振源について考えます．**図3**にも示すようにスペクトルがマイコンの動作周波数の整数倍にピークを持つことから，マイコンが不要電磁放射の発振源であると見て間違いありません．

● ワイヤ・ハーネスはアンテナになる

アンテナについて考えます．**図4**に示す構成において，プリント基板上の配線パターンとワイヤ・ハーネスは，①ループ・アンテナ，または②モノポール・アンテナになっていることが考えられます．これらアンテナの特徴を**表1**にまとめます．この表から分かるように，ループ・アンテナから放射される不要電磁波の強度E_d(V/m)は，ループ面積A×ループを流れる電流I_dに比例しています．一方で，モノポール・アンテナの場合，不要電磁波の強度E_c(V/m)は，アンテナの長さL×アンテナを流れる電流I_cに比例しています．

ここで，**図4**に示す一般の車載電子機器について考えます．まず，ループの面積Aは，最大限に見積もってマイコンが実装されるプリント基板の面積とします．この一般的なサイズを10cm四方の大きさとした場合，その面積は$0.01\mathrm{m}^2$となります．

アンテナの長さLはワイヤ・ハーネスの長さとします．一般的な自動車の車体を4mとし，この半分の長さ2mを用います．周波数は100MHzとし，このときのループ・アンテナ，およびモノポール・アンテナから放射される電界強度(E_dおよびE_c)を比較します．これらの計算式を以下に示します．簡単化のため，いずれの計算にも，$r=1\mathrm{m}$，$I_d=I_c=1$[A]を用いました．E_dとE_cは，

$$E_d = 1.32\times10^{-14}\times((0.01\times1\times(1.0\times10^8)^2)/1)$$
$$= 1.32\ [\mathrm{V/m}] \cdots\cdots(1)$$
$$E_c = 1.26\times10^{-6}\times((4\times1\times1.0\times10^8)/1)$$
$$= 252\ [\mathrm{V/m}] \cdots\cdots(2)$$

となります．この計算からも分かるように，各アンテナに同じ量の電流が流れた場合，ループ・アンテナからの放射量E_dに比べ，モノポール・アンテナからの放射量E_cの方が，約190倍(46dB)も大きいことが分かります．つまり，ハーネスに電流I_cが少量でも流れると，ハーネス自体が大変効率の良いアンテナとなり不要電磁波が放射されます．ここで気を付けておくべき点は，I_cはハーネスを流れるコモン・モード電流だということです．

● ハーネスを流れるコモン・モード電流が放射の源だ

ハーネスを流れるコモン・モード電流と不要電磁放射の関係を確かめた実験結果を，**図5**に示します．本実験の構成の様子を**図5(a)**に示します．マイコンが搭載された電子機器は長さ1.5mのハーネスに接続されます．このハーネスの電源およびグラウンドは，疑似電源回路網(LISN)によっていずれも50Ωで終端してあります．ハーネスを流れるコモン・モード電流は，電子機器から5cmのところを電流プローブで測定しました．また，機器から1mのところにバイコニカル型のアンテナを設置して，不要電磁放射量を測定しました．信号周波数が80MHzのときにハーネス

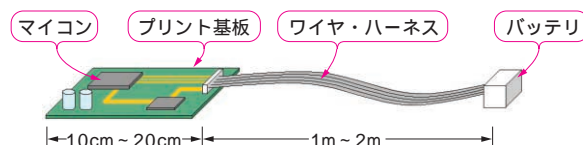



図4 車載電子機器の構成
車載電子機器では，バッテリからの電力供給やほかの機器との情報通信のため，通常，ワイヤ・ハーネスが接続される．

表1 ループ・アンテナおよびモノポール・アンテナの特徴

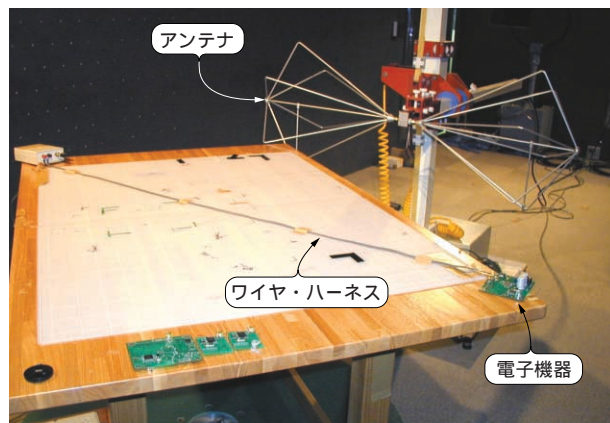
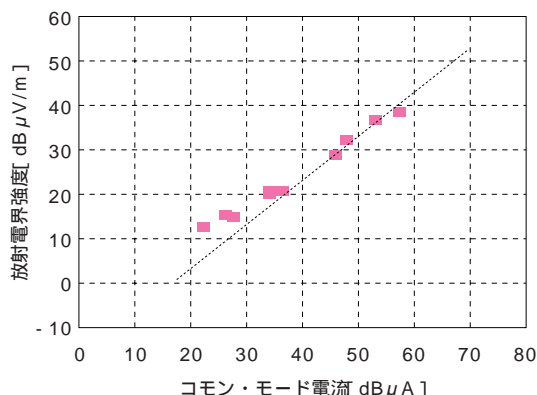
	①ループ・アンテナ	②モノポール・アンテナ
アンテナ形状と放射	電磁放射 アンテナ 高周波電流 励振源	電磁放射 アンテナ 高周波電流 励振源
放射電解強度	E_d[V/m] $=k_d((A\times I_d\times F^2)/r)$ K_d：定数(1.32×10^{-14}) A：ループ面積 I_d：電流 F：周波数 r：アンテナからの距離	E_c[V/m] $=k_c((L\times I_c\times F)/r)$ K_c：定数(1.26×10^{-6}) L：アンテナ長 I_c：電流 F：周波数 r：アンテナからの距離

(a) 不要電磁波測定のようす

(b) 信号周波数80MHzのときにハーネスを流れるコモン・モード電流と不要電磁放射強度の関係

図5 ハーネスを流れるコモン・モード電流と不要電磁放射の関係を確かめた実験結果

(a)は不要電磁波測定のようすを示す．機器に接続されたワイヤ・ハーネスから1mのところにアンテナを設置し，ここでの電界強度を測定する．(b)は，信号周波数80MHzのときにハーネスを流れるコモン・モード電流と不要電子放射強度の関係をプロットしたもの．両者は，ほぼ比例関係にあり，ハーネスのコモン・モード電流が不要電磁放射の要因であることが分かる．

を流れるコモン・モード電流と，不要電磁放射量の関係を**図5(b)**に示します．

この測定結果から明らかなように，不要電磁放射量は，ハーネスを流れるコモン・モード電流量にほぼ比例しています．従って，EMC対策は，コモン・モード電流の発生をいかに抑制するかが鍵になります．

3. マイコン搭載電子機器のコモン・モード電流発生メカニズム

本節では，マイコンを搭載する電子機器に対し，主に電源系におけるコモン・モード電流の発生メカニズムについて考えます．参考文献(1)，(2)などによると，ハーネスにおけるコモン・モード電流の発生メカニズムは電圧駆動タイプと，電流駆動タイプに大別されます．

● 発振回路や信号出力ピンなど電圧が急激に変動する回路で発生する

まず，電圧駆動タイプの特徴を考えます．発振回路や信号出力ピンなど，マイコンの動作によって電圧が急激に変動する回路が電子機器中に存在すると，この回路が持つ寄生容量を介して高周波電流が外部へ漏れ出します．この高周波電流がハーネスのグラウンドなどから帰還することにより，コモン・モード電流が発生するものと考えます．この電圧駆動によるコモン・モード電流発生のようすを**図6**にまとめます．電圧駆動タイプの対策法ですが，

- プリント基板上の電圧が急激に変化する部分をできるだけ小さくする
- シールドなどにより電位変動部分と外部との寄生容量を小さくする

などの対策が有効であると考えます．

● 配線パターンのインピーダンスのアンバランスで発生する

次に，電流駆動タイプの特徴を考えます．マイコンは通常，その内部に多数のCMOSドライバ回路を持ちます．このCMOSドライバ回路のスイッチング動作の際に，ほんのわずかな間，電源からグラウンドへ貫通電流と呼ばれる電流が流れます．この貫通電流は，**図7(a)**に示すように，そのほとんどがプリント基板上のマイコン近傍に実装されたバイパス・コンデンサを通り帰還します．

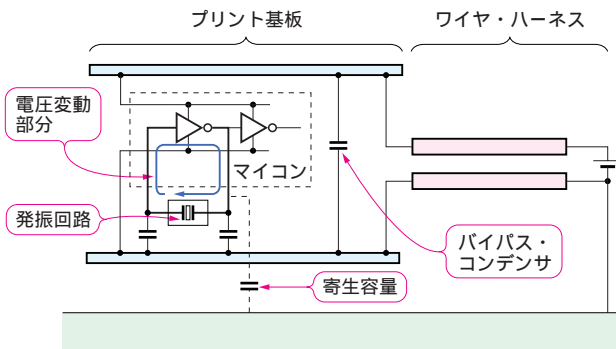
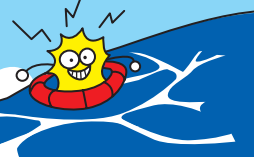
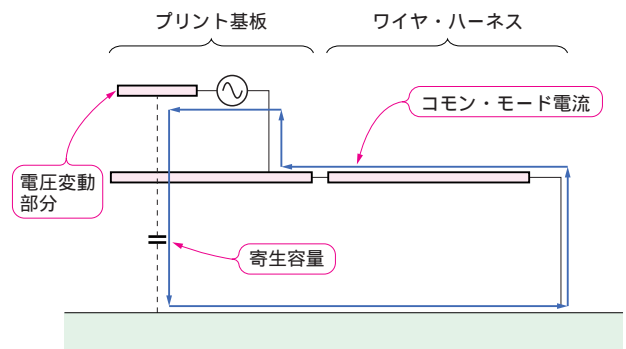
近似した等価回路を**図7(b)**に示します．L_v，L_gおよびC_v，C_gは，それぞれプリント基板配線における電源およびグラウンド配線のインダクタンスおよび寄生容量を表します．また，Z_v，Z_gはハーネスの電源ライン，グラウンド・ラインのインピーダンスであり，C_bはバイパス・コンデンサの容量です．V_dは貫通電流を流す電圧源です．バイパス・コンデンサは通常，0.1 μF程度のものが実装されます．また，プリント基板の電源やグラウンドの配線は，10nH程度のインダクタンスを持ちます．これより，問題とするラジオの周波数帯域(100MHz以下)におけるそれぞれのインピーダンスは以下のようになります．

（a）電圧変動が発生する個所

（b）ハーネスに流れるコモン・モード電流経路

図6　電圧駆動タイプによるコモン・モード電流発生のようす
(a)は電圧変動の例として，電子機器内の発振回路動作における電圧変動発生個所を示す．この電圧変動により，外部との間の寄生容量を通じて変位電流が流れ，これがハーネスへ帰還することでコモン・モード電流が流れる．このようすを(b)に示す．

●バイパス・コンデンサ

$|1/j\omega C_b|$　0.016 [Ω]……………………………………(3)

●配線インダクタンス

$|j\omega(L_v+L_g)|$　12.57 [Ω]…………………………………(4)

ただし，ω：角周波数とする．

実際には，バイパス・コンデンサが持つ寄生インダクタンスにより，上記の値よりもC_bのインピーダンスは増加すると思われます．それでも配線インダクタンスのインピーダンスに比べて十分小さくなります．従って，C_bは短絡とみなすことができ，**図7(c)**に示す回路に近似できます．Z_cはハーネスにおける電源ラインとグラウンド・ラインを並列に接続したときのインピーダンスです．

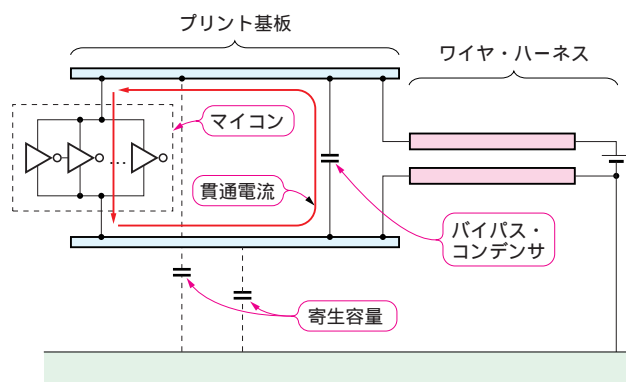
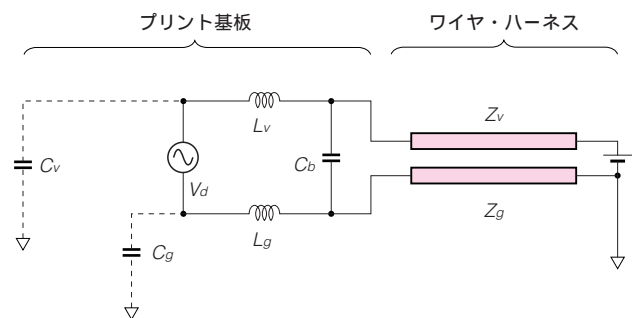
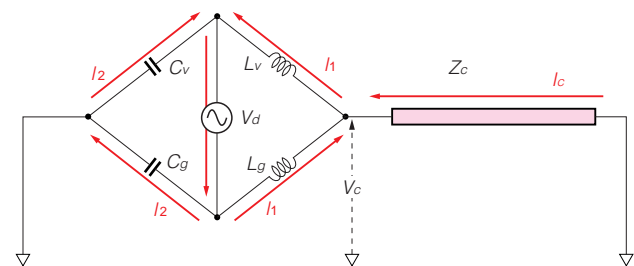
ここで，ハーネスを流れるコモン・モード電流ができるだけ小さくなるようなインピーダンスの条件を考えます．**図7(c)**の回路において，ハーネスを流れるコモン・モード電流をI_cとします．また，インダクタンスL_v，L_gおよびキャパシタC_v，C_gを流れる電流をそれぞれI_1，I_2とします．ハーネスが接続される点の電圧をV_cとすると，この電圧をゼロにすれば，コモン・モード電流I_cは発生しません．つまり，V_cを0にするような，L_vやL_g，C_v，C_gの条件を求め

（a）電子機器内においてマイコン動作で発生する貫通電流が主に通過する部分

（b）(a)の近似

（c）(b)の近似

図7　電流駆動タイプによるコモン・モード電流発生のようす
(a)は電子機器内において，マイコン動作で発生する貫通電流が主に通過する部分を示す．この回路を近似したものが(b)および(c)である．(c)の回路から，コモン・モード電流を抑制するための条件$L_vC_v=L_gC_g$が得られる．

ればよくなります．回路を流れる各電流に関し，

$I_1, I_2 \gg I_c$ ……………………………………(5)

であると仮定します．このとき，ハーネス接続点の電圧 V_c は以下のように表されます．

$$V_c = \frac{L_g C_g - L_v C_v}{(L_v + L_g)(C_v + C_g)} V_d \quad \cdots\cdots(6)$$

式(6)より，V_c を0にするためには，インダクタンスおよびキャパシタンスに関して，次の条件を満たす必要があります．

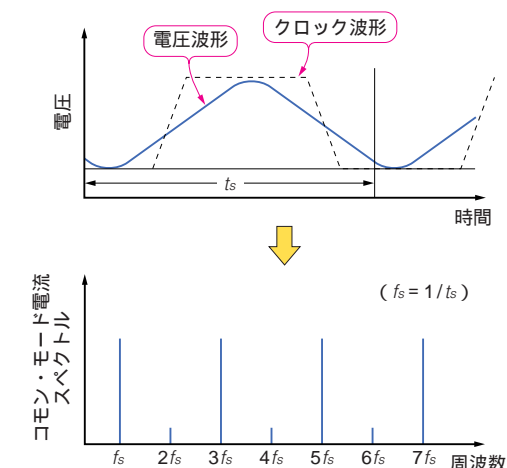
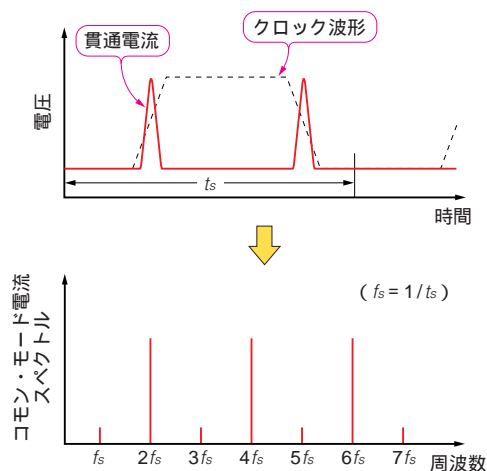
$L_g C_g - L_v C_v = 0$ ……………………………………(7)

(a) 電圧駆動タイプである発振回路における電圧変動と，これから発生するコモン・モード・スペクトルの周波数特性

(b) CMOSのスイッチング電流によって生ずる貫通電流のスペクトル周波数特性

図8　電圧駆動および電流駆動の各タイプで発生するコモン・モード電流スペクトルの周波数特性

(a)は動作周波数の奇数倍に強いピークを持つことが分かる．(b)は動作周波数の偶数倍に強いピークを持つ．

式(7)が意味することは，プリント基板の配線インダクタンスや寄生容量の値を最適に設計すれば，コモン・モード電流の発生を抑制できるということです．さらに，この条件式は周波数に依存していません．つまり，式(7)の条件を満たすような設計をすれば，いずれの周波数でも効果的にコモン・モード電流の発生を抑制できることになります．

● fの奇数倍と偶数倍にピークが現れる理由

次に，電圧駆動タイプおよび電流駆動タイプで発生するコモン・モード電流の周波数依存性について考えます．図8に，それぞれのタイプのスペクトルの特徴を示します．まず，電圧駆動タイプですが，マイコンが実装される電子機器における発生源としては，発振回路や信号出力ピンが挙げられます．図8(a)に発振回路での例を示します．発振回路における電圧変動波形は，正弦波の形状が少しひずんだものになっています．このため，電圧駆動タイプで発生するコモン・モード電流は，動作周波数 f の奇数倍(f, $3f$, $5f$, …)に強いピークを持つことが予想されます．

もう一方の電流駆動タイプは，CMOSのスイッチング動作時に発生する貫通電流が原因となります．図8(b)に示すように，貫通電流は，クロックの1周期において，立ち上がり時と立ち下がり時の合計2回流れます．このため，電流駆動タイプで発生するコモン・モード電流は，動作周波数 f の偶数倍($2f$, $4f$, $6f$, …)に強いピークを持つことが予想されます．

ここまでの検討結果を表2にまとめます．これらの分析結果を踏まえ，次節では実際のマイコンが搭載された評価用の電子機器を用いて，具体的な対策例を示します．

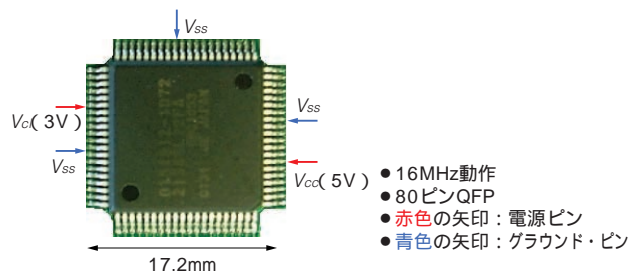
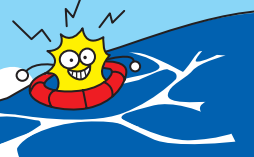



図9　評価に用いたマイコン

本マイコンは16MHzで動作し，80ピンのQFP(quad flat package)に封入してある．図の赤色の矢印で示す位置に電源ピンがある．5V(V_{CC})で入力された電源は，内部回路で降圧され，3V(V_{cl})で出力される．青色の矢印で示す位置に，3本のグラウンド(V_{SS})ピンがある．

4. 実例に見るコモン・モード電流低減手法

これまでの検討結果をもとに，実際のマイコン搭載評価機器により，具体的な対策方法を実験により検証します．

● 評価したのは動作周波数16MHzのマイコン基板

評価に用いたマイコンを図9に示します．このマイコンの動作周波数は16MHzです．また，2MHzの信号出力ピンを持ちます．このマイコンを実装する評価基板を図10に示します．外形は100mm×100mmであり，2層基板です．この基板にマイコンを駆動する水晶振動子も実装します．このマイコンを実装した評価基板に対し，図11に示す実験の構成で，マイコン動作時のハーネスを流れるコモン・モード電流を測定しました．

図12に何も対策しない場合のコモン・モード電流スペクトルの測定結果を示します．この結果から分かるように，16MHz，32MHz，48MHz，64MHz，…と，16MHzの整数倍の周波数にピークがあることが分かります．これ以外に，18MHz，22MHz，26MHz，30MHz，…と，2MHzの奇数倍周波数にもピークがあります．前節での考察を考慮すると，コモン・モード電流のピークは，以下が原因で発生しているものと推測されます．

①16MHzの奇数倍周波数（赤矢印）：発振回路の電圧変動
②16MHzの偶数倍周波数（青矢印）：マイコン・ドライバの貫通電流
③2MHzの奇数倍周波数（上記以外）：信号出力ピンの電圧変動

表2 電圧駆動タイプおよび電流駆動タイプにより発生するコモン・モード電流の発生要因および特徴，対策方法

	電圧駆動タイプ	電流駆動タイプ
発生要因	発振回路や信号出力など，マイコン動作によって電圧が急激に変動する部分が発振源	マイコン動作に伴う貫通電流が発振源．電源およびグラウンド配線のインピーダンスのアンバランスにより発生
特徴	動作周波数の奇数倍に強いピークを持つスペクトル	動作周波数の偶数倍に強いピークを持つスペクトル
対策方法	●電圧変動部分の面積を小さくする ●シールドなどによる外部との寄生容量の低減	電源およびグラウンド配線のインピーダンスのバランス最適化 $L_vC_v = L_gC_g$ L_v，L_g：電源，グラウンド配線のインダクタンス C_v，C_g：電源，グラウンド配線の寄生容量

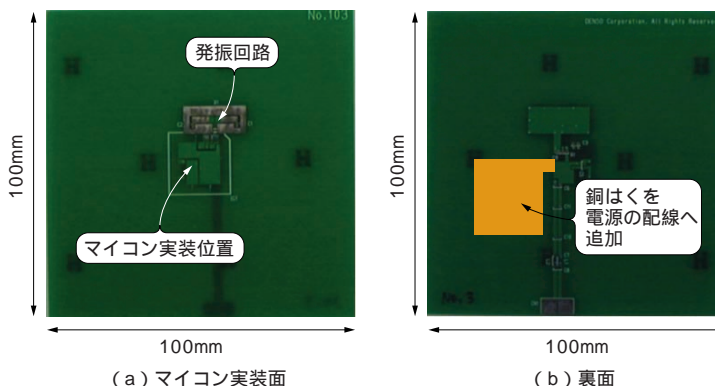



図10 評価基板

コモン・モード測定に用いた評価基板．評価基板の大きさは10cm×10cmであり，マイコンおよび発振回路，バイパス・コンデンサを実装するよう設計してある．裏面には，電源配線の寄生容量を調節する目的のため，銅はくによるパターンを追加できるようにしてある．

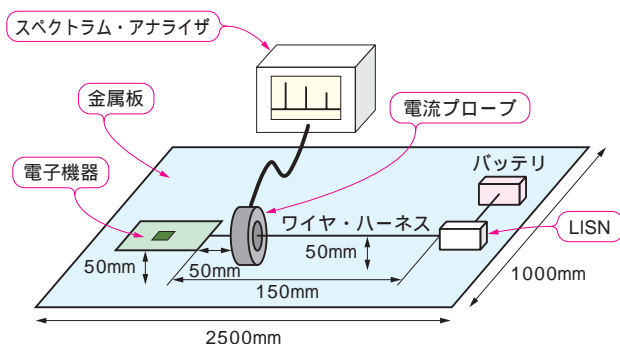



図11 コモン・モード電流測定の構成

金属板の上部50mmの位置に電子機器およびワイヤ・ハーネスを設置し，マイコン動作により発生するコモン・モード電流を測定する．電流プローブは，電子機器から50mmの位置に固定されている．

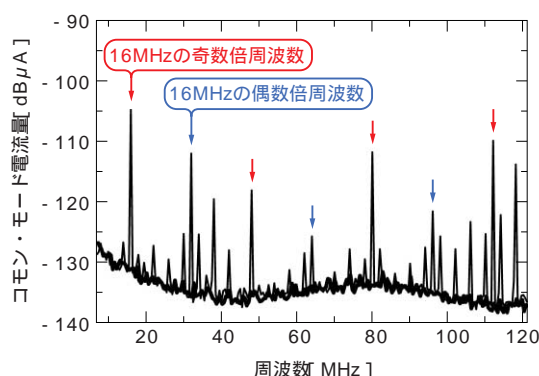



図12 何も対策しなかった場合のコモン・モード電流スペクトル

対策する前のコモン・モード電流スペクトルは，マイコン動作周波数である16MHzの整数倍の位置に強いピークが存在することが分かる．これ以外に，2MHzの奇数倍周波数にもピークが存在している．

● 電圧変動で発生するコモン・モード電流の対策例

まず，①の発振回路の電圧変動で発生するコモン・モード電流の対策について考えます．今回の評価に用いた水晶振動子は，比較的大きな金属製のカバーに覆われています．内部での発振動作時において，この金属製カバーが電位変動を起こし，これがコモン・モード電流を発生させていることが考えられます．そこで，この金属製カバーの電位変動を安定化させる目的で，金属製カバーとプリント基板のグラウンド配線とを銅はくで接続し，再度コモン・モード電流を測定しました．

結果を**図13**に示します．何も対策しなかったときの測定結果である**図12**と比較して，16MHzの奇数倍周波数（16MHz，48MHz，80MHz，112MHz）におけるピークが大きく減少していることが分かります．一方で，16MHzの偶数倍周波数（32MHz，64MHz，96MHz）や2MHzの奇数倍（18MHz，22MHz，26MHz，30MHz，…）におけるピーク値は，ほとんど変化していません．これより，本評価基板では，水晶振動子のカバーにおける電位変動が，電圧駆動タイプのコモン・モード電流を引き起こしていたことが分かります．銅はくによる電位安定化により，コモン・モード電流の発生を最大20dB程度抑制できました．

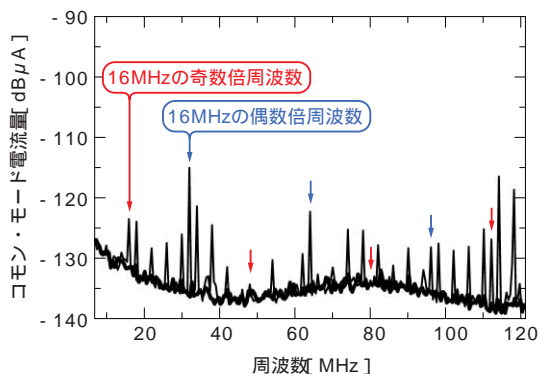



図13　発振回路にシールドを施したときのコモン・モード電流スペクトル

発振回路にシールドを施すと，16MHzの奇数倍周波数のピークが大きく減少している．一方で16MHzの偶数倍周波数や2MHzの奇数倍周波数におけるピークはほとんど変化していないことが分かる．

● 電流変動で発生するコモン・モード電流の対策例

次に，②の電流変動タイプで発生するコモン・モード電流の対策について検討します．前項の検討では，プリント基板の配線インダクタンスや寄生容量を最適化することで，コモン・モード電流の発生を抑制できる結果となりました．そこで，**図10**に示すように，プリント基板の電源側配線に銅はくパターンを追加することで，寄生容量C_vを変化させ，ハーネスにおけるコモン・モード電流の変化を測定しました．この実測結果を**図14**に示します．

図14(a)は，16MHzの偶数倍周波数におけるピーク値だけの変化をプロットしたものであり，**図14(b)**は，同じように16MHzの奇数倍周波数におけるピーク値をプロットしたものです．両グラフの縦軸はコモン・モード電流量です．横軸はプリント基板における電源とグラウンド配線の面積比の対数を取ったもので，グラフの右側に行くに従い，電源配線の面積が大きくなります．

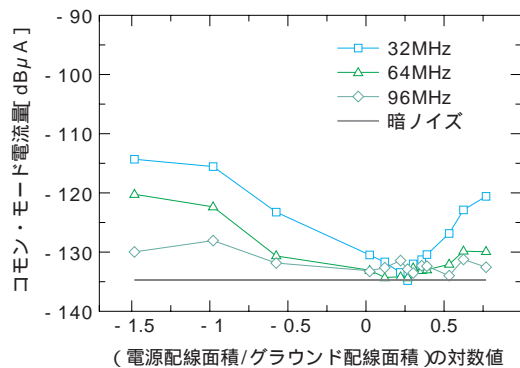
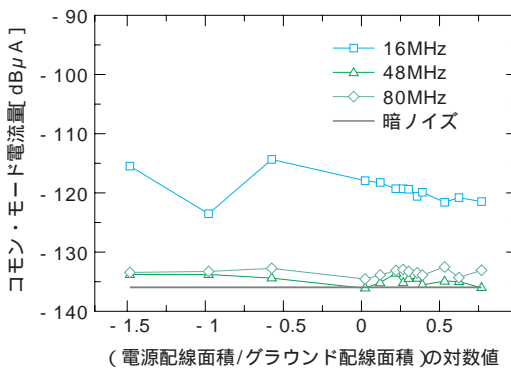
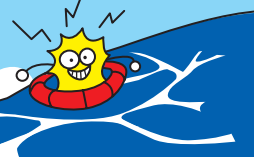
図14(a)から，測定した32MHz，64MHz，96MHzの

(a) 動作周波数16MHzの偶数倍周波数におけるピーク値の変化

(b) 動作周波数16MHzの奇数倍周波数におけるピーク値の変化

図14　基板の電源配線に銅はくパターンを追加し，電源配線の寄生容量を追加したときの，各周波数におけるコモン・モード電流スペクトル変化のようす

(a)は動作周波数16MHzの偶数倍周波数におけるピーク値の変化を示している．この結果より，測定したいずれの周波数でも(電源配線面積/グラウンド配線面積)の対数値が約0.26で，発生するコモン・モード電流量が最小となっていることが分かる．(b)は動作周波数16MHzの奇数倍周波数でのピーク値の変化を示している．(a)に比べ電源面積やグラウンド面積を変えても，ピーク値はほとんど変化していないことが分かる．特に，48MHzおよび80MHzでは低い値を保ったまま．

いずれの周波数においても，横軸［Log（電源配線面積/グラウンド配線面積）］の値が約0.26の点においてコモン・モード電流の発生が最小値になっていることが分かります．特に32MHzにおいては，本手法により20dB程度の低減効果を示しています．

一方で，図14（b）より，16MHz，48MHz，80MHzの奇数倍周波数においては，電源/グラウンド配線の面積比の変化によらず，ほぼ一定の値を取っています．特に，48MHzと80MHzはいずれも低い値を保ったままとなっています．これより，電源/グラウンド配線のインダクタンスや寄生容量を最適化させることで，コモン・モード電流の発生を抑制できることが分かりました．

今回は寄生容量だけを変化させましたが，インダクタ素子などを実装して対策しても同じ効果があるものと考えます．また，今回は③の信号出力ピンが原因で発生するコモン・モード電流に関して実測していませんが，ダンピング抵抗の実装などで対策できるものと考えます．

ここまで実験結果で見たように，電圧変動や電流変動で発生するコモン・モード電流に対しては，シールドやプリント基板レイアウトを適切に設計することで，効果的な対策が可能であることが示されました．製品開発の際も，設計初期の段階でこれら対策法を考慮した設計を行うことが低コストで効率的にEMC問題をクリアする近道になるものと考えます．

5. EMC設計に向けた今後の取り組み

将来に向けたEMC設計への取り組みについて考えます．本章の冒頭でも述べましたが，不要電磁放射対策を効果的かつ効率的に行うには，製品試作後において問題が顕在化してから対策を施すのではなく，製品開発の初期段階におけるEMC問題を考慮した設計（いわゆるEMC設計）が重要であると考えます．

● 上流における対策がより大きな効果を生み出す

これまでの検討結果を踏まえ，図15にマイコンを搭載する電子機器における不要電磁放射発生までの流れを示します．まず，マイコン自身がノイズ発生に対する発振源となります．マイコンが動作することで，パッケージやプリント基板における電圧変動や配線インピーダンスのアンバランスによるコモン・モード電流が発生します．ここで発生したコモン・モード電流は，プリント基板上からハーネスまで波及します．ハーネス自体が効率の良いアンテナとなり，不要電磁波が放射されます．

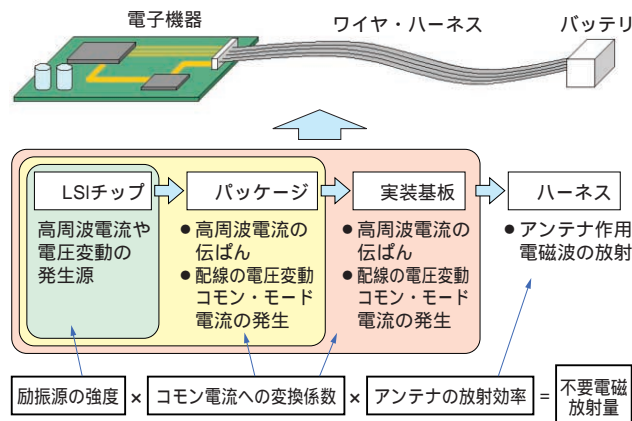



図15 マイコン搭載電子機器における不要電磁放射発生までの流れ
EMC対策を考えた場合，この順序の上流に行くほど効果が大きいと考える．

不要電磁放射の強度は，「マイコンの発振源としての強度」×「パッケージ，実装基板でのコモン・モードの変換係数」×「ハーネスでのアンテナ係数」となることが予想されます．これより，EMC問題発生の上流から下流までの順序は，①LSIチップ→②パッケージ→③実装基板→④ハーネスとなります．EMC対策を考えた場合，この順序の上流に行くほど効果が大きいと考えます．

問題は対策にかかるコストです．まず，最上流であるマイコンついて考えます．新規に開発するものであれば，チップの配置配線やCMOSドライバの駆動能力の最適化，スイッチング特性の改善などの対策でノイズを低く押えたマイコンが開発できるものと考えます．しかし，既存製品の対策を考えた場合，マスク・パターンなど設計変更にかかるコストが高く，あまり現実的ではありません．そこで，本節では，プリント基板とパッケージの各レベルにおける効果的な対策方法について議論します．

● EMCルール・チェッカや電磁界シミュレータを利用する

まず，プリント基板レベルの対策について考えます．現状，EMCルール・チェッカなどのツールがあります．このツールはEMC対策事例を事前にデータベース化しておき，配線CADと組み合わせて，プリント基板のレイアウト作成時に後々問題となりそうな部分を指摘してくれるものです．ソフトウェアの使用方法を習得すれば，誰もが簡単にEMCを考慮したプリント基板の設計を行える点で，

4

非常に有効なソフトウェアであると考えます．このEMCルール・チェッカに，今回の検討結果をルール化して追加することも，コモン・モード電流低減を目指した設計に有効であると考えます．

これ以外に，製品完成時のEMCレベル予測精度を向上させ，製品の試作回数をさらに削減できる手法があります．マイコンのシミュレーション用モデルと電磁界解析を組み合わせた評価です．マイコンは，その製品ごとに発生するノイズ・レベルが異なります．参考文献(3)，(4)などにあるように，これらのマイコンに対し，コンパクトで高精度なシミュレーション・モデル化が可能となっています．このマイコンのモデルと，有限要素法やPEEC法(5)などのシミュレーション手法を組み合わせ，プリント基板の詳細な形状やバイパス・コンデンサの実装位置などに依存するコモン・モード電流の発生量を高精度に予測可能になるでしょう．これにより，必要最低限の対策で，効率的なEMC対策ができるものと考えます．このマイコン・モデルと電磁界解析を組み合わせた評価の概観を**図16**に示します．

● パッケージ内部の配線やコンデンサで対策する

次に，パッケージ・レベルでの対策について考えます．内部に搭載するチップはそのままに，パッケージ内部の配線形状の修正などだけで，どこまでマイコン・ユーザのEMC設計に対する負担を軽減できるかを検討しました．この実験パッケージの外観を**図17**に示します．本試作品は17.2mm×17.2mmと，従来のパッケージと同サイズとします．内部にインピーダンス・バランス補正用のインダクタやバイパス・コンデンサ，発振回路などを内蔵可能できます．

従来品と同じピン配置であるため，本試作品をそのまま

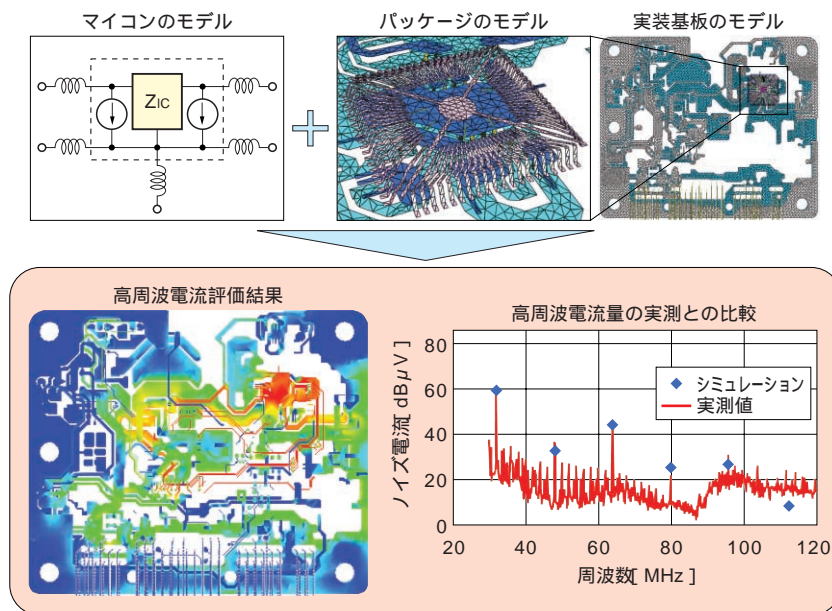



図16
マイコンのモデルと電磁界解析を組み合わせた評価の概要
近年開発されている高精度なシミュレーション・モデルと電磁界解析を組み合わせることにより，従来よりも精度高く製品完成後のノイズ・レベルを評価可能になるものと考える．

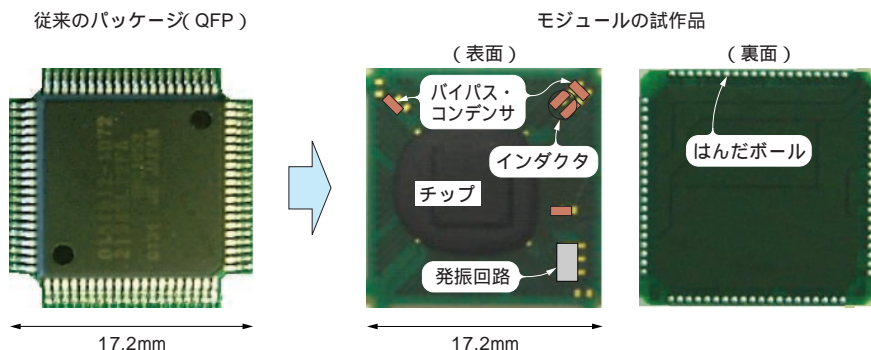
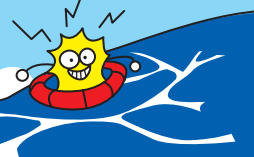



図17
従来のパッケージと開発中のマイコン・モジュールとの比較
開発中のモジュールは，従来のパッケージと同サイズでありながら，内部にコモン・モード電流抑制のための素子(インダクタ，コンデンサ，発振回路など)を内蔵している．また，従来と同じピン配列であるため，載せ替えるだけで低ノイズ化が可能であり，ユーザの負担が少ない．さらに，発振回路などをプリント基板に実装する必要がないため，実装面積の削減にも効果がある．

置き換えるだけで，同じ動作が可能です．また，内部にバイパス・コンデンサや発振回路を内蔵しているため，プリント基板上に同様なものを実装する必要がありません．実装面積の削減が可能になります．本試作品のコモン・モード電流の削減効果は，**図18**に示すように実測で確認できています．パッケージ・レベルでも大幅な放射抑制が可能なことを確認しました．こうした結果をもとに，低EMIパッケージ構造を実現していく予定です．

＊　　＊　　＊

本章では，マイコン搭載電子機器からの不要電磁放射低減に関して議論しました．不要電磁放射低減には，マイコン動作で発生するコモン・モード電流を抑制する対策が重要であること，このためには電圧変動を抑制するシールドやインピーダンス・アンバランスをなくした配線パターン設計が重要であることを述べました．また，今後の取り組みとして，マイコン・モデルや電磁界解析による評価手法やパッケージ・レベルでの対策手法などを簡単に議論しました．

EMCは，対象となる製品ごとに問題となる周波数や規制のレベルも異なります．しかし，機器からの不要な電磁放射を抑制するという目的はどれも同じです．今回の検討が電子機器のEMC設計のお役に立てれば幸いです．

本章における理論的な考察および実験結果の多くは，デンソー システム開発部第1開発室との共同研究の成果に基づくものです．初期段階から共同研究に参加いただき，ともに検討していただいた同開発室の市川浩司氏ならびに鵜生高徳氏には深く感謝いたします．

図18　開発モジュールと従来パッケージのコモン・モード電流発生量の比較

従来のパッケージに比べ，開発したモジュールはコモン・モード電流発生量を大幅に（最大20dB程度）削減可能であることが確認できた．現在，より詳細な性能を評価中．

参考・引用*文献

(1) D. M. Hockanson, J. L. Drewniak, T. H. Hubing, T. P. Van Doren, F. Sha, M. J. Wilhelm；Investigation of fundamental EMI source mechanism driving common-mode radiation from printed circuit boards with cables, IEEE Transactions on Electromagetic Campatibilyty, vol.38, no.4, pp.557-566, Nov. 1996.

(2) 馬淵雄一, 中村篤, 林亨, 市川浩司, 鵜生高徳, 水野広；ワイヤ・ハーネスが接続された電子機器の電源系コモン・モード電流発生メカニズムおよび低減手法の検討, 電子情報通信学会論文誌C, vol. J89-C, no.11, Nov. 2006.

(3) 高山恵介, 木下智博, 松石拓也, 松永茂樹, 王志良, 豊田啓孝, 和田修巳, 古賀隆治, 福本幸弘, 柴田修；LSIの電源端子電流モデルのEMIシミュレーションへの適用, 電子情報通信学会論文誌B, vol. J86-B, no. 2, Nov. 2003.

(4) 福本幸弘, 松石 拓也, 豊田 啓孝, 和田 修己, 古賀 隆治；LSI電源端子電流モデルの簡易決定手法, 電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ, 環境電磁工学, vol.100, no.207, pp. 49-54, Jul. 2000.

(5) H. Heeb, A. E. Ruehli；Three-dimensional interconnect analysis using partial element equivalent circuits, IEEE Transaction on Circuits and Systems, vol. 38, no. 39, pp.974-982, Nov. 1992.

まぶち・ゆういち
㈱日立製作所
なかむら・あつし
㈱ルネサス テクノロジ
おおまえ・あや
㈱日立製作所

<筆者プロフィール>

馬淵雄一．日立研究所に所属．入社以来，電磁界シミュレーション技術および電子機器の低ノイズ実装技術の研究開発に従事．社命により2006年10月から米国ベンチャ企業の調査・投資業務のため北米在勤．広めた視野を生かして研究活動に復帰したいと考えている．

中村 篤．1982年，日立製作所に入社．現在，ルネサス テクノロジ 生産本部 技術開発統括部に所属し，パッケージ電気特性解析，高速・低ノイズ実装技術およびEMC設計技術の開発に従事．近磁界分布マップから実装基板の症状を的確に診断したいと考えて久しいが，未だ誤診がなくならない．

大前 彩．生産技術研究所に所属．電子機器およびLSIの低ノイズ実装技術の研究開発に従事．アンテナ理論のようにいかない難しさに悩みつつ，実測から見え隠れする輻射メカニズムの本質に近づこうと暗室滞在が長くなっている．